

Infrarote Galaxien

Elsässer, Hans

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1993 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.161-173



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

HANS ELSÄSSER

Infrarote Galaxien*

Die Astronomie hat in jüngster Zeit viel Neues über die Entstehung der Sterne gelernt. Wie und wo sich Sterne bilden, ist heute eine der Beobachtung zugängliche Thematik: Innerhalb unseres eigenen Milchstraßensystems sind jetzt eine ganze Reihe von Regionen identifiziert, in denen gegenwärtig Sterne in der Entstehung begriffen oder vor kurzem entstanden sind. Dies ist neuen, der modernen Technologie erwachsenen Meßmethoden zu verdanken, die der Astronomie das Infrarote und den daran anschließenden Bereich der kürzesten Radiowellen erschlossen haben.

Die Geburt von Sternen beginnt im interstellaren Raum bei sehr tiefen Temperaturen, in Wolken aus molekularem Gas und kleinen Staubeilchen. Strahlung dieses frühen Stadiums kommt deshalb im Infraroten zum Vorschein. Und auch in etwas späteren Phasen des neuen Sterns macht sich dieser vorwiegend als infrarote Quelle bemerkbar, da er noch immer in einer kalten Staubhülle steckt, die seine Strahlung absorbiert und zu längeren Wellen umsetzt. Der Millimeterbereich dagegen ist für die Beobachtung der ausgedehnten Molekülwolken, der Brutstätten neuer Sterne, von Bedeutung. Herr Mezger hat in seinem Vortrag näheres dazu ausgeführt.

Die Entdeckung von Galaxien mit stark überhöhter Strahlung im Infraroten weckte vor wenigen Jahren die Hoffnung, anhand dieser Objekte auch Einblick in die frühe Entwicklung der großen Sternsysteme, ähnlich dem Milchstraßensystem, zu erhalten; das hat sich jedoch bisher nur unvollkommen bestätigt. Dagegen kamen so bis dahin unbekannte Phänomene zutage, von denen jetzt zunächst die Rede sein soll.

Wechselwirkende Systeme und „Starbursts“

Auf infrarote Galaxien (Abb. 1) ist man vor allem durch die Messungen des 1983 gestarteten Satelliten IRAS (Infrared Astronomy Satellite) aufmerksam geworden. Mit ihm war es zum ersten Mal möglich, den ganzen Himmel nach Quellen langwelliger Infrarotstrahlung (bis 100 μm) zu durchmustern, also in einem Bereich von Wellenlängen, für den die Atmosphäre ein undurchdringliches Hindernis darstellt und der deshalb vom Erdboden aus nicht zu fassen ist.

Der IRAS hat viele Tausende vorher unbekannter Quellen entdeckt, nicht zuletzt in Himmelszonen nahe der Milchstraßenpole, in einer für die Beobachtung extragalaktischer Objekte besonders günstigen Blickrichtung. In vielen Fällen blieb jedoch die Natur der gefundenen Quellen vorerst unklar, weil es an optischen Identifikationen fehlte und selbst im Palomar Sky Survey, einem bis zu recht schwachen Helligkeiten reichenden photographischen Himmelsatlas, vielfach kaum oder gar keine Spuren zu sehen sind.

* Vortrag vor der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 11. Juni 1993.

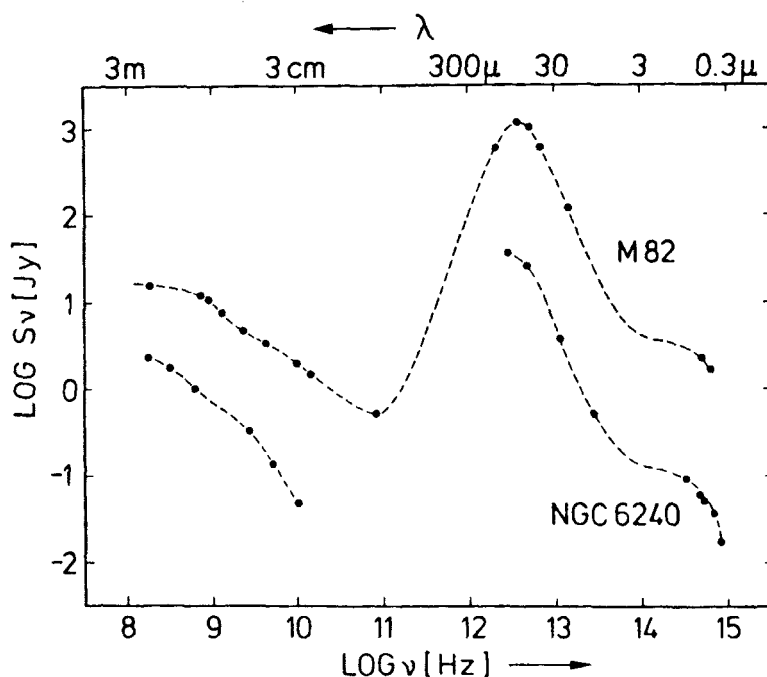


Abb. 1:

Spektrale Energieverteilung S in Abhängigkeit von der Frequenz ν bzw. Wellenlänge λ von zwei Infrarotgalaxien. Sichtbarer Teil des Spektrums am rechten Ende, Radiobereich links. Siehe auch

Die vom IRAS stammenden Informationen betreffen die Helligkeit der gefundenen Quellen und ihre mit bestimmten Fehlern behaftete Position am Himmel. Seine „Sehschärfe“ reichte dagegen nicht aus, Einzelheiten ihrer Struktur zu erkennen, so daß Aussagen über die Natur der Objekte zusätzliche Beobachtungen verlangten.

Programme dieser Art waren und sind an mehreren Observatorien im Gange, auch auf dem Calar Alto, der Sternwarte des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Süds Spanien. So hat U. Klaas, einer meiner Doktoranden, mit dem dortigen 3,5 m-Teleskop an einer Reihe der vom IRAS ermittelten Positionen langbelichtete CCD-Bilder aufgenommen. (CCD = Charge-Coupled Device, ein Halbleiterdetektor hoher Quantenausbeute, der die Beobachtungstechnik im Optischen revolutioniert hat.) Das geschah zwar bei merklich kürzeren Wellenlängen als denen der IRAS-Durchmusterung, brachte aber eine weit bessere räumliche Auflösung, und viele der Objekte waren dank der hohen Empfindlichkeit der Kombination „Teleskop + CCD“ in der Tat im Sichtbaren zu identifizieren. Außerdem hat sich die Hoffnung, in der Nähe des nördlichen Milchstraßenpols viele extragalaktische Quellen zu finden, erfüllt. Die eigentliche Überraschung war jedoch der hohe Anteil an gestörten und offensichtlich wechselwirkenden Systemen.

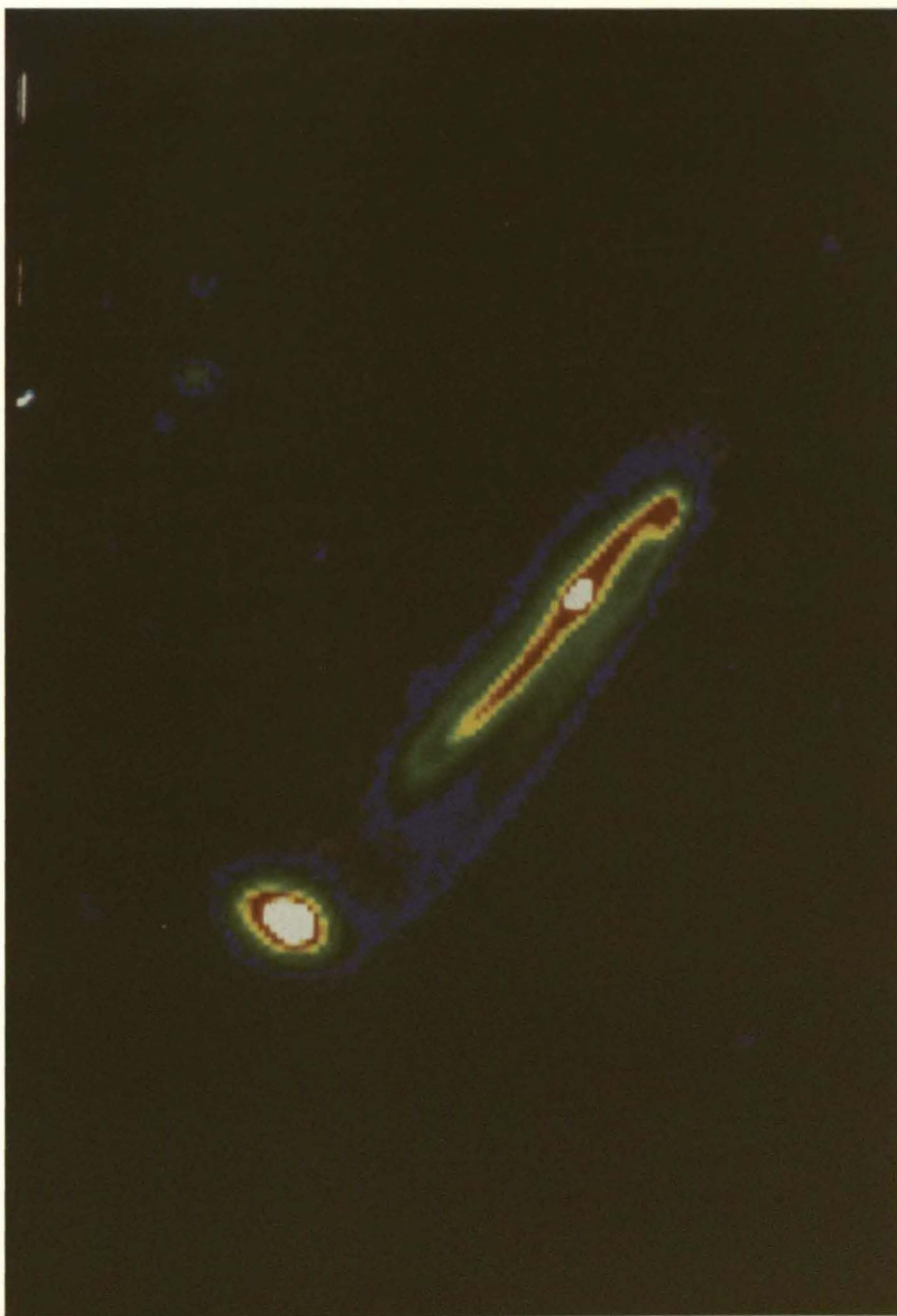


Abb. 2:
Galaxienpaar in Wechselwirkung an der Position der IRAS-Quelle 01270 + 3101 nach einer
CCD-Aufnahme mit dem 3,5 m-Teleskop der Calar Alto Sternwarte (Falschfarbenbild).

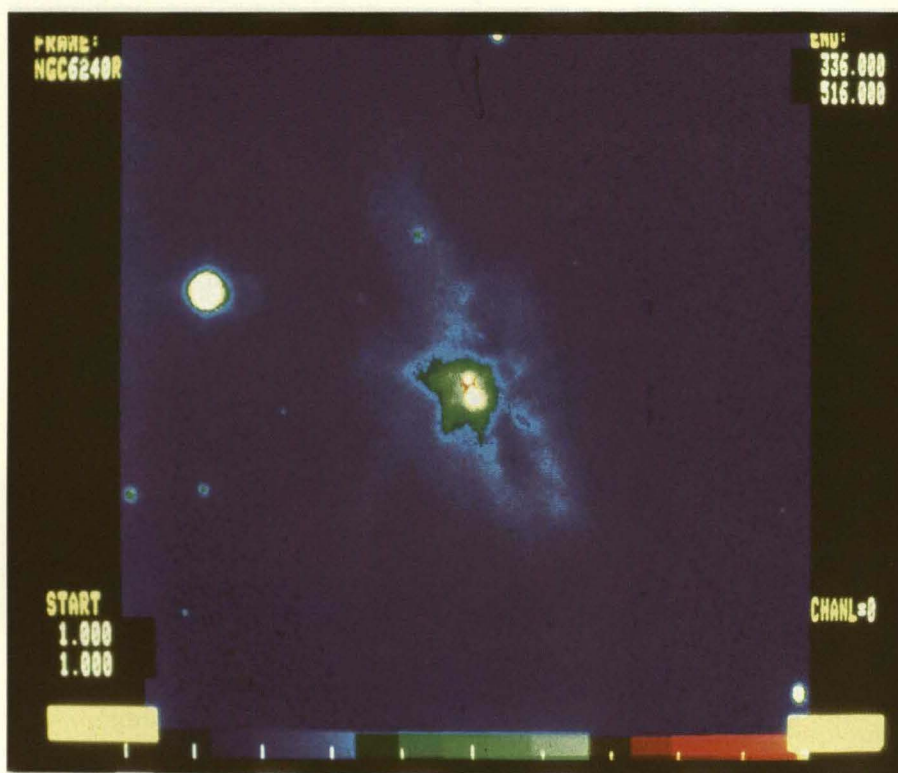


Abb. 3:

NGC 6240 mit zwei Kernen, allem Anschein nach zwei Spiralgalaxien in Kollision, nach einer CCD-Aufnahme mit dem 2,2 m-Teleskop der Calar Alto Sternwarte (Falschfarbenbild).

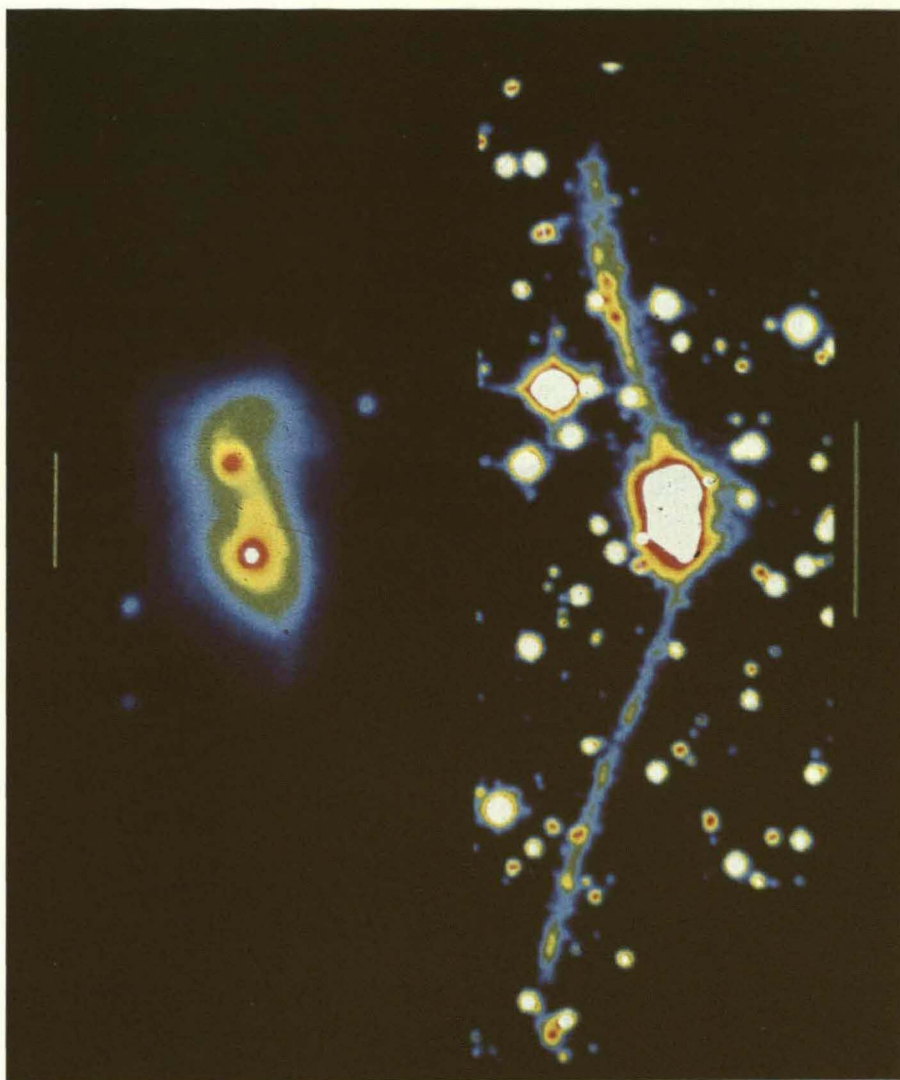
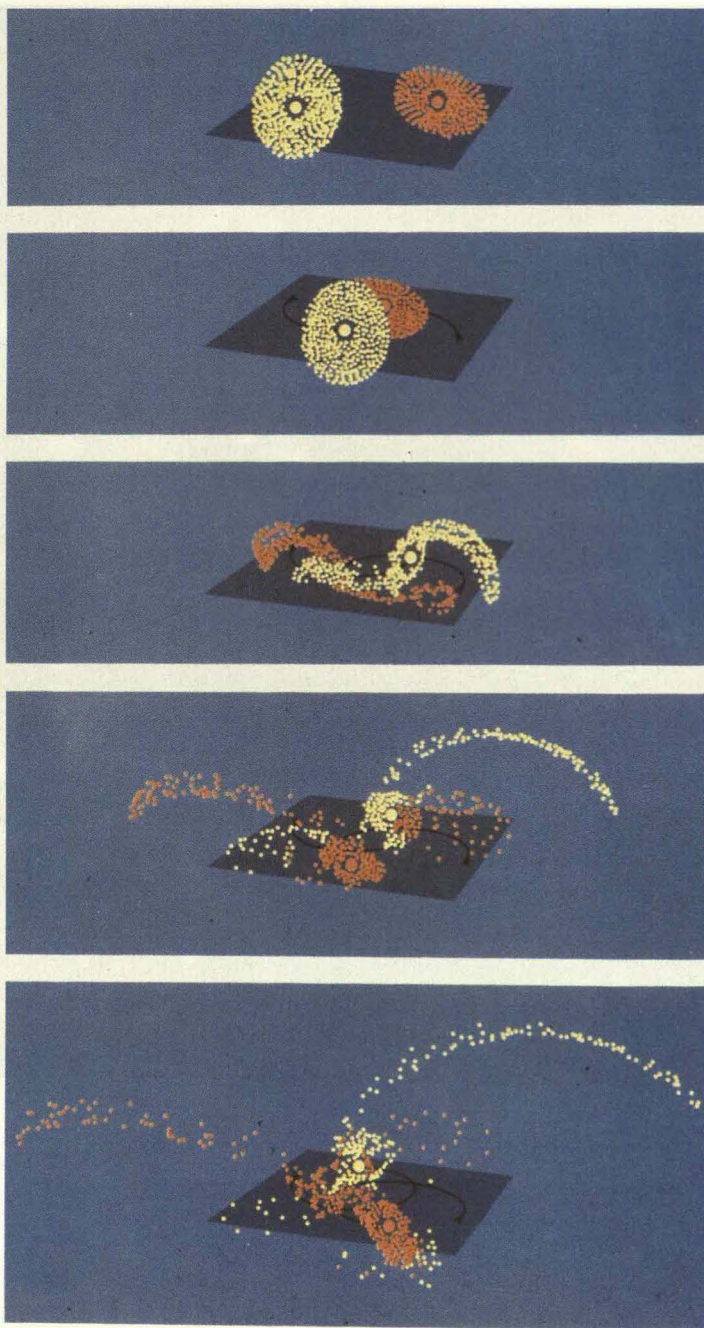


Abb. 4:

Die „Superantenne“ (IRAS-Quelle 19254–7245) nach einer CCD-Aufnahme mit dem 2,2 m-Teleskop der La Silla Sternwarte. Rechts der herausvergrößerte Zentralbereich mit den zwei Kernen der verschmelzenden Galaxien (Falschfarbenbild).



Die Galaxien sind nicht gleichmäßig im Raum verteilt, sondern gehören in der Regel einem übergeordneten Verband, einer kleinen Gruppe oder einem mitgliederstarken Haufen an. Innerhalb dieser Nester laufen sie mit Geschwindigkeiten zwischen 100 und 1000 km/sek um den gemeinsamen Schwerpunkt, einem Mückenschwarm ähnlich umschwirren sie dieses Zentrum in ungeordneter Bewegung. Dabei ändern sich ihre gegenseitigen Abstände, es kommt zu nahen Vorbeiflügen oder gar zur Kollision zweier Systeme. Bereits bei einer Begegnung auf Distanz führt die gegenseitige Schwereanziehung zu Deformationen des regulären Aufbaus, die in Verbiegungen der Galaxienkörper, in herausgezerrten Schwänzen oder in Lichtbrücken zwischen den korrespondierenden Partnern ihren Ausdruck finden. Nahe Passagen oder der direkte Zusammenstoß können auch in einer Verschmelzung der beiden Partner enden: Aus zweien wird dann *ein* größeres massereicheres System.

Diese Phänomene sind in den letzten Jahren mit zum Teil sehr aufwendigen Rechnungen auf Computern simuliert worden. Wie schon einfache Überlegungen zeigen, verhalten sich die Sterne dabei grundsätzlich anders als das interstellare Medium. Ihre gegenseitigen Abstände sind so groß, daß sie selbst bei einer Galaxienkollision in aller Regel aneinander vorbeifliegen. Sie unterliegen nur dem sich verändernden Schwerfeld, das aber ihre Bahnen merklich modifizieren und den Aufbau der betroffenen Systeme völlig umkrempeln kann. In allen diesen Fällen wächst die Energie der inneren Bewegungen auf Kosten der Bahnenergie beider Galaxien. Ähnliches gilt für den Drehimpuls: Insbesondere die lang ausgezogenen Schwänze entnehmen den ursprünglichen Bewegungen viel Drehimpuls.

Die interstellare Materie spürt natürlich auch die Variation des Schwerfeldes, wegen der relativ geringen freien Weglänge im diffusen Medium – im Vergleich zu den Sternen – kommen aber komplexe gasdynamische Effekte dazu. Für unsere Thematik ist vor allem interessant, daß durch die gravitative Störung, diesen Eingriff von außen, interstellare Wolken offenbar in den Schwerekollaps gekippt werden können mit der Folge weiträumiger Sternbildung, einem „burst of star formation“, kurz „starburst“. Dafür sprechen auch die Emissionslinienspektren der Galaxien und die für Sternentstehungsgebiete typischen Regionen ionisierten Wasserstoffs (HII). Man findet hier in großem Maßstab, was eingangs kurz zur Entstehung einzelner Sterne angedeutet wurde.

Die Abbildungen 2–4 und 6 enthalten einige Beispiele solcher infraroter Galaxien. Das längliche System in Abb. 2 erinnert an eine Spiralgalaxie, die wir gerade von der Seite sehen. Ihre Hauptebene ist aber deutlich verbogen. Auch der helle Knoten am oberen Ende, eine riesige HII-Region, ist abnormal. Der (grüne) Ausläufer mündet in eine

▯ Abb. 5

Rechnersimulation von A. und J. Toomre für ein dem in Abbildung 4 ähnliches „Antennensystem“. Jede der beiden Galaxien ist durch 350 Massenpunkte repräsentiert. Die beiden Systeme sind um 60° gegeneinander geneigt. Die Bilder zeigen von oben nach unten eine Folge verschiedener Entwicklungsstufen während der durch Pfeile angedeuteten Bewegung; im untersten sieht man die entstandene Struktur 750 Millionen Jahre nach der engsten Annäherung.

Brücke zu der rundlichen Galaxie im unteren Teil und dürfte von der Schwerkraft der letzteren herausgezogen worden sein. Beide Systeme sind von einem gemeinsamen Lichthof umgeben und tauschen offenbar Materie aus. Daß sie von uns gleich weit, etwa 1 Milliarde Lichtjahre, entfernt sind und nicht zufällig durch Projektion als Doppelsystem erscheinen, geht aus ihren identischen, durch die kosmische Expansion bedingten Radialgeschwindigkeiten hervor.

Das in seiner chaotischen Form ganz ungewöhnliche Objekt NGC 6240 (Abb. 3) dürfte uns den Zusammenstoß zweier Galaxien vorführen. Es ist ebenfalls eine intensive Infrarot- und Radioquelle (vgl. Abb. 1). Ihr Zentrum besteht aus zwei 1.8 Bogensekunden voneinander getrennten Kernen. Diese sind in eine ausgedehnte Region heißen, hochturbulenten Gases eingebettet. Ein Spektrum des Kernpaares zeigt um 150 km/sec differierende Radialgeschwindigkeiten der beiden hellen Knoten. Alles spricht dafür, daß wir hier zwei ursprünglich getrennte Spiralgalaxien in einer sehen: die gravitativ verformten und ineinander verschlungenen Arme, wie die relativ zueinander bewegten Kernpartien. Diesen Fall simulierende Modellrechnungen legen nahe, daß innerhalb einer weiteren Million Jahre die völlige Verschmelzung der Kerne zu erwarten ist, und in einigen 100 Millionen Jahren, nach dem völligen Abbau der Bahnenergie der kollidierenden Partner, diesem Chaos eine normale Galaxie entwachsen sein wird.

Ein weiteres, wahrhaft spektakuläres Beispiel ist die in Abb. 4 gezeigte „Superantenne“ des südlichen Himmels, die neuerdings von D. Lutz, einem anderen unserer Doktoranden, untersucht wurde. Es handelt sich ebenfalls um einen „merger“, ein verschmelzendes Galaxienpaar. Die beidseitigen dünnen Schwänze, sie erstrecken sich insgesamt über 1 Million Lichtjahre, enthalten eine ganze Reihe auffälliger HII-Knoten, in denen junge heiße Sterne stehen. Das überbelichtete Zentrum ist im rechten Teil der Abbildung mit höherliegenden Helligkeitskonturen herausvergrößert; hier kommen die zwei noch deutlich getrennten Kerne zum Vorschein. Das System ist reich an interstellarem Gas und Staub, mehr als 80 Prozent der intensiven Infrarotstrahlung stammen aus dem Kernbereich. Die langen Ausläufer, die in ähnlicher Art von einem Objekt des Nordhimmels bekannt sind, resultieren aus den gegenseitig ausgeübten Gezeitenkräften der beiden Stoßpartner und lassen sich in einer Simulationsrechnung, mit bestimmten Annahmen über die Bahnen und Orientierungen der aufeinanderzulaufenden Galaxien, nachbilden (Abb. 5).

Die ebenfalls mit einer IRAS-Quelle identische Galaxie im Zentrum von Abb. 6 zeigt neben ihrem auffallend dünnen, knotigen Schwanz starke Abweichungen von jeglicher Symmetrie, auch in den inneren Teilen. Wir vermuten, daß auch dieses ungewöhnlich große Objekt aus der Verschmelzung zweier ursprünglich getrennten Systeme hervorgegangen ist. Es ist deshalb besonders interessant, weil seine Leuchtkraft mit mehr als 10^{12} Sonnenleuchtkräften an die der absolut hellsten Galaxien, die man heute kennt, an die Quasare heranreicht. Und es stellt sich deshalb die Frage, ob wir hier das Vorstadium eines Quasars sehen, für den sich der typische überhelle Kern, der dann in großer Entfernung als quasistellarer Lichtpunkt erscheint, erst noch herausbilden wird.

Die gesteigerte Abstrahlung dieser Systeme im Infraroten ist eine Folge der lawinenartig verstärkten Umsetzung von diffuser interstellarer Materie in Sterne, ausgelöst

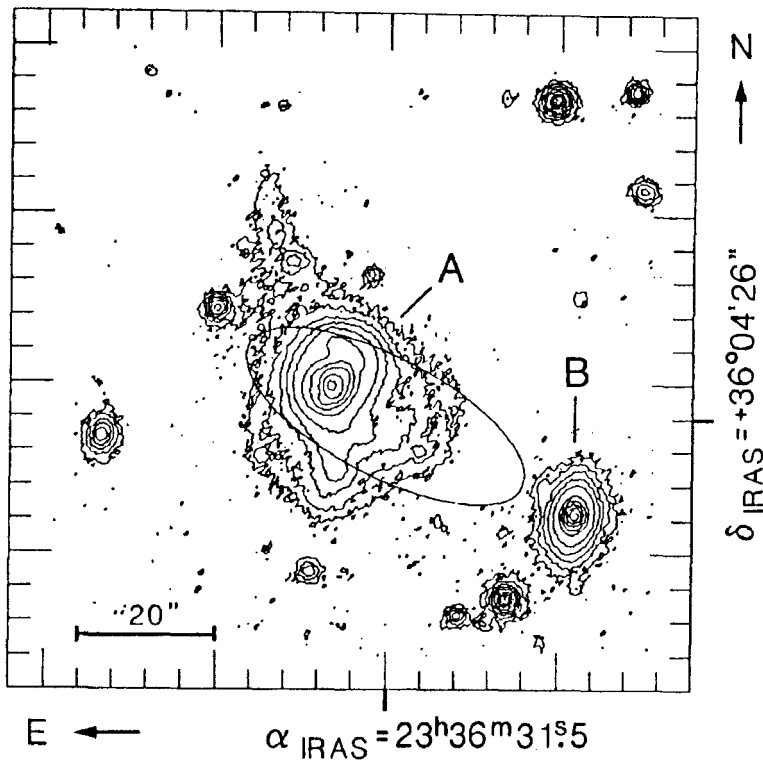


Abb. 6:

Das optische Gegenstück der IRAS-Quelle 23365 + 3604 in Isophotendarstellung nach einer CCD-Aufnahme mit dem 3,5 m-Teleskop der Calar Alto Sternwarte. Die Ellipse entspricht der Unsicherheit der vom Satelliten bestimmten Position.

durch die nahe Begegnung bzw. die gegenseitige Durchdringung. Die beteiligten Partner sind ausgewachsene Galaxien mit allen Anzeichen alter Sternpopulationen, die aber noch immer über einen ausreichenden Vorrat an interstellarem Material verfügen.

Zur Galaxienentstehung

Von den frühen Phasen der Galaxienentwicklung haben wir vorerst so gut wie keine empirischen Befunde: Bisher konnten eindeutig junge oder in der Entstehung begriffene Galaxien nicht gefunden werden. In aller Regel enthalten die bekannten Systeme alte Sternpopulationen und, soweit die Beobachtungen Aussagen dieser Art zulassen, schwere chemische Elemente, ein anderes Indiz für beträchtliches Alter. Es sieht so aus als sei die weit überwiegende Mehrheit der Galaxien, wie unser Milchstraßensystem, in den er-

sten Milliarden Jahren nach dem Urknall entstanden als der Kosmos noch ganz jung war. Und diese Frühphase wird bislang von unseren Beobachtungen nicht erreicht. Das verdeutlicht die Abb. 7.

Ihr rechter Teil charakterisiert die heutigen empirischen Erfahrungen. In Abhängigkeit von der durch die kosmische Expansion bedingten Rotverschiebung $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, λ gemessene Wellenlänge einer Spektrallinie, λ_0 deren Ruhewellenlänge) zeigen die schraffierten Bereiche den gegenwärtig von Beobachtungen erfaßten Teil des Universums. Solange $z \ll 1$ ist entspricht der Zahlenwert von z der Fluchtgeschwindigkeit v in Bruchteilen der Lichtgeschwindigkeit c . Bei großen z -Werten ist zur Berechnung von v in km/sek eine relativistische Korrektur nötig. Heute werden v -Werte $> 0.9 c$ beobachtet. Bis zu recht großen Fluchtgeschwindigkeiten wächst z gemäß der Hubbleschen Relation mit der Entfernung linear an. Die rechte z -Skala ist deshalb gleichzeitig eine Skala steigender Entfernung.

Normale Galaxien werden in unserer näheren kosmischen Umgebung bis zu etwa $z = 0,2$ ($v = 60\,000$ km/sek) beobachtet. Die verschiedenen Arten aktiver Galaxien, zu denen auch die vorher angesprochenen Infrarotgalaxien gehören, sind wegen ihrer gesteigerten Leuchtkraft noch in merklich größeren Distanzen zu untersuchen. Von den vielen Quasaren, sie strahlen bis zum 1000fachen der Energie einer Normalgalaxie ab, kennen wir heute einige mit Rotverschiebungen zwischen $z = 4$ und 5. (Die Ly α -Linie des Wasserstoffs mit ihrer Wellenlänge von 1216 Å im irdischen Labor ist im Spektrum eines Quasars mit $z = 4.0$ beim 5fachen, bei $\lambda = 6080$ Å, im Roten zu finden!). Ihre Distanzen liegen jenseits von 10 Milliarden Lichtjahren, es sind die am weitesten entfernten bekannten Objekte.

Das Intervall zwischen $z \approx 5$ und 1000 ist ein „weißer Fleck“, Quellen mit Rotverschiebungen dieses Bereichs sind bisher nicht registriert worden. Dann aber, bei $z \approx 1000$, stoßen wir wieder auf eine empirisch gesicherte Insel: die 1965 durch Zufall entdeckte kosmische Hintergrundstrahlung. Sie wird gegenwärtig von dem COBE-Satelliten der NASA mit vorher nicht erreichter Präzision erneut vermessen und schon die jetzt vorliegenden Resultate bestätigen, daß sie aus allen Richtungen des Himmels in völlig gleicher Stärke bei uns eintrifft. Ihre Energieverteilung entspricht exakt dem Planckschen Strahlungsgesetz mit der Temperatur $T = 2,73$ Grad über dem absoluten Nullpunkt, deshalb „3-Kelvin-Strahlung“. Die Abweichungen $\Delta T/T$ davon in verschiedenen Himmelsrichtungen sind kleiner als $4 \cdot 10^{-5}$.

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist ein Relikt des Urknall-Feuerballs und als solches lange vor ihrer Entdeckung vorhergesagt worden. Sie ist einer der stärksten Beweise dafür, daß das Universum aus einem heißen hochkomprimierten Zustand heraus entstanden ist. Ihre ursprünglich extrem hohe Temperatur hat sich mit der Expansion des Raumes, an der sie teilnimmt und ihren Charakter als Plancksche Strahlung beibehält, heute auf wenige Grad absolut abgekühlt. Am Anfang in enger Wechselwirkung mit der heißen Materie des Feuerballs hat sie sich einige 100 000 Jahre nach dem Urknall bei wenigen tausend Grad Temperatur von dieser getrennt und breitet sich seither unbehindert im Weltall aus. $z = 1000$ entspricht der Abkühlung von 3000 K auf 3 K, einer Rotverschiebung des Maximums ihrer Energieverteilung von 1 μm zu 1 mm Wellenlänge.

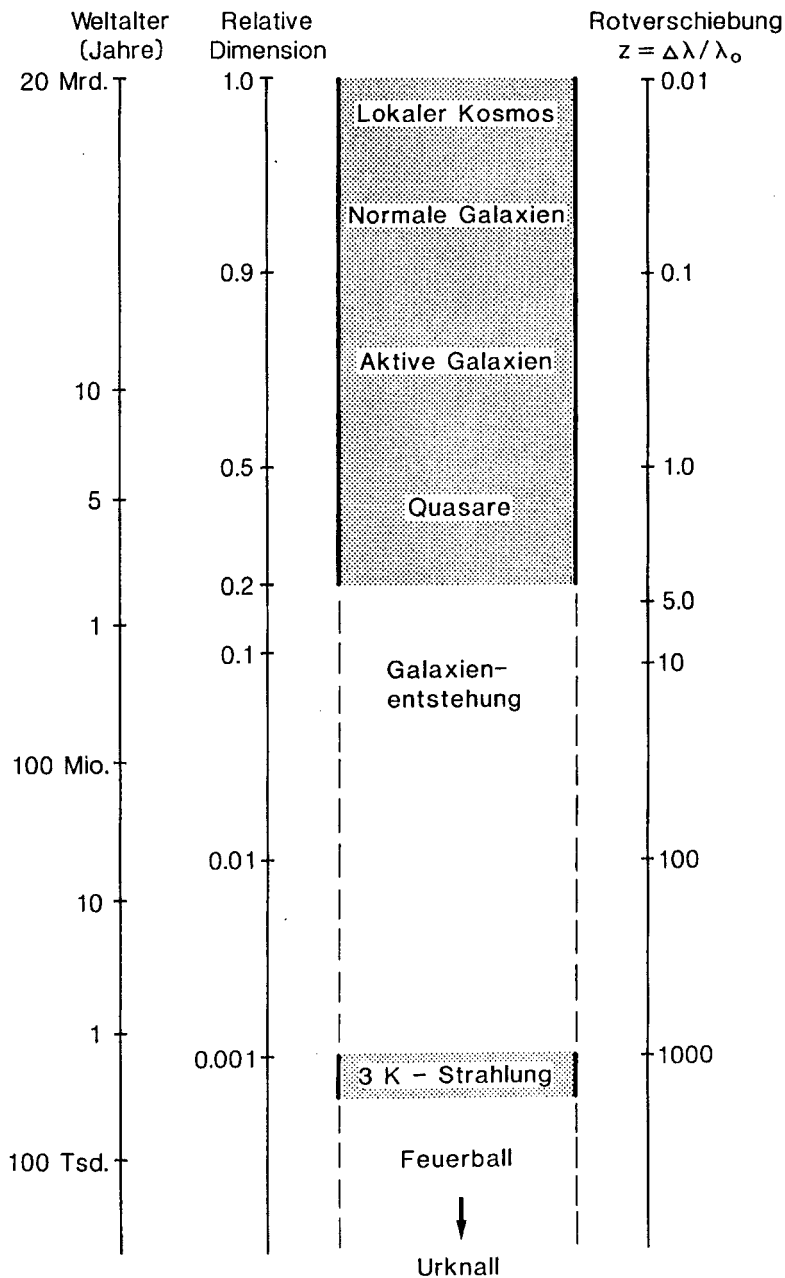


Abb. 7:

Räumliche und zeitliche Struktur des Universums in Abhängigkeit von der Rotverschiebung z (rechts).
 Schraffiert: Empirisch erfaßte Schichten. Zur Erläuterung siehe Text.

Die beiden linken Skalen von Abb. 7 verbinden die Rotverschiebung z der rechten Seite nach einem gängigen Weltmodell, das auf Friedmann und die Allgemeine Relativitätstheorie zurückgeht, mit der kosmischen Zeitskala und den räumlichen Dimensionen. Dafür ist die empirisch zu ermittelnde, leider aber noch immer nicht ganz zweifelsfrei gesicherte Hubblesche Konstante H nötig, die den Zusammenhang zwischen Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie und ihrer Entfernung angibt. Hier ist der plausible Wert $H = 50 \text{ km/sek pro Megaparsec Distanzschrift}$ verwendet, der einem Weltalter von rund 20 Milliarden Jahren entspricht. (Die folgenden Schlüsse sind jedoch von diesen Einzelheiten weitgehend unabhängig.)

Infolge der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes führen uns die Beobachtungen weit entfernter Systeme tief in die Vergangenheit zurück, in Zeiten als die kosmischen Dimensionen, etwa die gegenseitigen Abstände der Galaxien, nur geringe Bruchteile der heutigen ausmachten. So reichen nach Abb. 7 die jetzigen Beobachtungen von Galaxien im Extrem bis auf etwa ein Zehntel des heutigen Weltalters, d. h. bis auf fast 2 Milliarden Jahre, an den Ursprung des Universums heran. Wie schon erwähnt, sehen wir bis dahin im wesentlichen voll ausgebildete, fertige Systeme.

Die Hintergrundstrahlung stammt dagegen aus einer viel früheren Phase, als es noch keine Galaxien gab. Man hatte erwartet, daß dieser Strahlung wenigstens erste Spuren der Galaxienbildung eingeprägt sein müßten, geringe lokale Temperaturabweichungen und kleine Schwankungen ihrer Intensität beim Vergleich benachbarter Stellen am Himmel, gewissermaßen als Abdrücke der Saatkörner, denen die Galaxien entwachsen sind. Davon ist jedoch trotz der hohen Genauigkeit der gegenwärtigen Messungen so gut wie nichts zu merken, die ursprünglichen Prognosen waren jedenfalls viel zu optimistisch.

Dieser Kontrast, einerseits die ausgeprägt inhomogene Verteilung der Galaxien im Raum, ihre Haufen und die neuerdings erkannte Superstruktur, andererseits die unglaublich gleichförmige Hintergrundstrahlung, ist in jüngster Zeit in den Medien und anderswo öfters als Argument gegen den Anfang des Universums im hochverdichteten Feuerball, im „Big Bang“, bewertet worden. Diese Kritik an gut begründeten und empirisch gesicherten Konzepten ist nichts als ein voreiliger Kurzschluß, wie die Abb. 7 verdeutlicht.

Wegen der dort so deutlich in Erscheinung tretenden lückenhaften Kenntnis der kosmischen Frühgeschichte wissen wir kaum Zuverlässiges über die Galaxienentstehung. Insbesondere ist vorerst nicht zu entscheiden, ob sich etwa als erstes großräumige Strukturen inhomogener Materieverteilung herausgebildet haben, die danach in Galaxien aufgebrochen sind oder ob der Anfang aus vielen relativ kleinen Kondensationen bestand, die analog dem vorher beschriebenen Verschmelzungsprozess zu größeren Systemen angewachsen sind.

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist ein Fossil des frühen unstrukturierten Universums. Wie daraus der hochstrukturierte Kosmos mit Galaxien, ihren Haufen und Superhaufen geworden ist, werden wir erst verstehen können, wenn es gelingt, die in der Abbildung angedeuteten Grenzen zu durchstoßen. Mit lichtstärkeren Teleskopen der neuen Generation, wie sie gegenwärtig im Bau sind, sollte das möglich sein. Dabei werden Messungen im infraroten Spektralbereich eine zentrale Rolle spielen, allein schon des-

halb, weil diese Zeitschichten infolge der Expansion des Raumes für uns tief ins Rote gerückt worden sind.

* * *

Der Anlaß zu diesem Vortrag ist die Verleihung der C.F.Gauß-Medaille an Prof. H.-H.Voigt, den früheren Direktor der Göttinger Sternwarte. Über Jahrzehnte hinweg sind wir beide, Herr Voigt und ich, uns vielfach begegnet, in Gremien, denen wir gemeinsam angehörten, in der Astronomischen Gesellschaft und bei anderen ähnlichen Gelegenheiten. Zur ersten engeren Berührung kam es, als er 1959 zur Hamburger Sternwarte wechselte und mir als seinem Nachfolger eine der Assistentenstellen der Göttinger Sternwarte übertragen wurde. Dann hatten wir recht intensiv miteinander zu tun für die erste „Denkschrift zur Lage der Astronomie“ in der Bundesrepublik. Herr Voigt war von der Deutschen Forschungsgemeinschaft damit betraut worden, das dafür nötige Material zusammenzutragen und in Form zu bringen. Mitautoren der Schrift wurden F.Becker, Bonn, W.Fricke und H.Elsässer, Heidelberg sowie E.Kirste von der DFG. Ich erinnere mich lebhaft an mehrere Treffen in Bonn, wo es um die endgültigen Formulierungen ging.

Diese 1962 erschienene Denkschrift hat den Ausbau unserer Astronomie in den darauffolgenden Jahren nachhaltig beeinflusst. Insbesondere war sie ein wesentlicher Anstoß für die Gründung der drei Max-Planck-Institute für Extraterrestrische Physik in Garching, für Radioastronomie in Bonn und für Astronomie in Heidelberg. Ich meine, es sei eine angebrachte Geste des Dankes, wenn diese drei Institute mit den heutigen Vorträgen Herrn Kollegen Voigt ihre Reverenz erweisen.

Prof. Dr. H. Elsässer
Max-Planck-Institut für Astronomie
Königstuhl 17 · 69117 Heidelberg